

Primljen / Received: 18.11.2018.

Ispravljen / Corrected: 25.3.2019.

Prihvaćen / Accepted: 25.4.2019.

Dostupno online / Available online: 10.8.2019.

# Otpornost na izvijanje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika

## Autori:



<sup>1</sup>Aljoša Filipović, dipl.ing.građ.  
[afilipovic@grf.bg.ac.rs](mailto:afilipovic@grf.bg.ac.rs)



<sup>1</sup>Izv.prof.dr.sc. Jelena Dobrić  
[jelena@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:jelena@imk.grf.bg.ac.rs)



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. Zlatko Marković  
[zlatko@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:zlatko@imk.grf.bg.ac.rs)



<sup>2</sup>Mr.sc. Nancy Baddoo  
[n.baddoo@steel-sci.com](mailto:n.baddoo@steel-sci.com)



<sup>3</sup>Mr.sc. Željko Flajs  
[zeljko.flajs@institutims.rs](mailto:zeljko.flajs@institutims.rs)

<sup>1</sup>Sveučilište u Beogradu, Srbija  
Građevinski fakultet

<sup>2</sup>Institut za čelične konstrukcije, Velika Britanija

<sup>3</sup>Institut za ispitivanje materijala Beograd, Srbija

Prethodno priopćenje

Aljoša Filipović, Jelena Dobrić, Zlatko Marković, Nancy Baddoo, Željko Flajs

## Otpornost na izvijanje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika

U radu je prikazano numeričko istraživanje tlačnog kapaciteta elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika kako bi se procijenili postupci projektiranja navedeni u Eurokodu 3. Istraživanje je usmjereno na tlačne elemente izvedene kutnicima jednakih krakova sa zglobnim spojevima na kraju, u kvaliteti austenitnog nehrđajućeg čelika EN 1.4301. Utvrđeno je da primjena krivulje izvijanja b, koja se koristi za projektiranje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od toplo valjanog ugljičnog čelika, daje veću i otpornost na izvijanje koja nije na strani sigurnosti u slučaju ekvivalentnih tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika u područjima niske i srednje vitkosti u usporedbi s numeričkim rezultatima.

### Ključne riječi:

nehrđajući čelik, tlačni element izveden kutnikom, izvijanje, analiza konačnih elemenata, Eurokod 3

Preliminary note

Aljoša Filipović, Jelena Dobrić, Zlatko Marković, Nancy Baddoo, Željko Flajs

## Buckling resistance of stainless steel angle columns

A numerical study of compressive capacities of stainless steel angle columns is presented in the paper in order to assess the design procedures presented in Eurocode 3. The study focuses on pin-ended hot-rolled equal angle columns made of austenitic stainless steel grade EN 1.4301. The study shows that the implementation of buckling curve b, used for the design of carbon steel hot-rolled angles, gives higher and unsafe buckling resistance of equivalent stainless steel angles in low and intermediate slenderness domains in comparison with numerical results.

### Key words:

stainless steel, angle column, buckling, finite element analysis, Eurocode 3

Vorherige Mitteilung

Aljoša Filipović, Jelena Dobrić, Zlatko Marković, Nancy Baddoo, Željko Flajs

## Biegefestigkeit von Druckelementen aus Edelstahlwinkeln

Die Arbeit enthält eine numerische Studie zum Druckvermögen von Elementen aus Edelstahlwinkeln, um die in Eurocode 3 festgelegten Entwurfsverfahren zu bewerten. Die Forschung konzentriert sich auf Druckelemente, die aus gleichschenkligen Winkeln mit Gelenkverbindungen am Ende in der Qualität des austenitischen rostfreien Stahls EN 1.4301 hergestellt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Anwendung der Biegekurve b, die für die Auslegung von Druckelementen aus warmgewalztem Kohlenstoffstahl verwendet wird, bei gleichwertigen Druckelementen aus Edelstahlwinkeln in Bereichen mit geringer und mittlerer Stärke eine höhere und nicht sicherheitsrelevante Biegefestigkeit im Vergleich zu numerischen Ergebnissen ergibt.

### Schlüsselwörter:

Edelstahl, Druckelement aus Winkeln, Verbiegung, Analyse fertiger Elemente, Eurocode 3

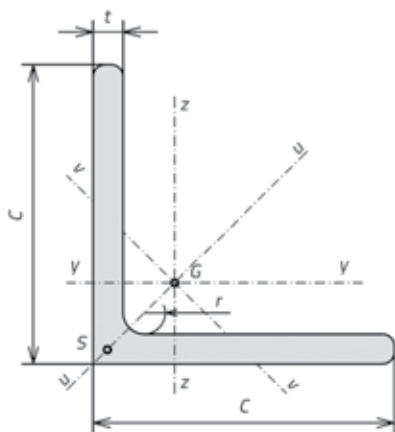
## 1. Uvod

### 1.1. Osnovni podaci

Pojedinačni elementi izvedeni kutnicima izloženi tlaku obično se u građevinarstvu koriste kao elementi rešetkastih konstrukcija, rešetkastih dalekovodnih tornjeva, komunikacijskih konstrukcija ili složenih stupova. Ako se te konstrukcije nalaze u agresivnim ili urbanim sredinama, mogu se korisno iskoristiti brojne legure od nehrđajućeg čelika zbog njihove otpornosti na koroziju, privlačnog izgleda, malih zahtjeva za održavanjem, dobre čvrstoće, žilavosti i svojstava kod umora.

Konstruktivski dijelovi od nehrđajućeg čelika (npr. elementi I-oblika, kutnici, U-presjeci, T-presjeci, pravokutni šuplji profili) mogu se proizvesti hladnim oblikovanjem, vrućim valjanjem, ekstrudiranjem i elektrolučnim ili laserskim zavarivanjem. Toplo valjani kutnici od nehrđajućeg čelika dostupni su u veličinama krakova do približno 150 mm duljine. Veći kutnici su napravljeni hladnim oblikovanjem ili zavarivanjem.

Iako je geometrija kutnog profila jednostavna, njezina asimetrija i nepoklapanje središta posmika (S) s težištem profila (G) može dovesti do složenog određivanja tlačnog kapaciteta elemenata izvedenih kutnicima (slika 1.). Položaj središta posmika na sjecištu krakova kutnika proizvodi zanemarivu krutost na torzijsko krivljenje. Prema tome, ovisno o svojstvima materijala, vitkosti poprečnog presjeka, ukupnoj vitkosti i rubnim uvjetima, otkazivanje centrički tlačno opterećenog elementa izvedenog kutnikom nastaje zbog izvijanja savijanjem oko slabije glavne osi poprečnog presjeka ili izvijanja savijanjem i torzijom. Nadalje, tlačni elementi izvedeni kutnicima su obično povezani na svojim krajevima preko jednog kraka, što uводи ekscentričnosti povezane s težištem profila i dovodi do dvoosnih deformacija pri savijanju koje posljedično utječu na njihov krajnji konstrukcijski odgovor.



Slika 1. Oznake na kutniku s jednakim krakovima

Projektiranje centrički tlačno opterećenih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika zasad nije pokriveno europskim normiranim postupkom. Zbog nedostataka eksperimentalnih

podataka u ovom konstrukcijskom području ubrzo su slijedile odredbe za projektiranje u EN 1993-1-4 [1], oslanjajući se isključivo na pretpostavljene analogije s ekvivalentnim elementima od ugljičnog čelika. Točka 5.4.1 [1] dopušta primjenu odgovarajućih odredbi navedenih u EN 1993-1-1 [2] i EN 1993-1-3 [3] za projektiranje tlačnih elemenata od nehrđajućeg čelika, ali s izmjenama navedenim u odredbi 5.4.2 [1]. Međutim, analitička metoda u odredbi 5.4.2 ne navodi izričito vrijednosti ni faktora nesavršenosti niti ograničavajuću vitkost za kutnike od nehrđajućeg čelika u odgovarajućoj ravlini izvijanja, ovisno i o proizvodnom procesu i vrsti čelika. Iznimke od ovog pravila obično su označene kao hladno oblikovani otvoreni elementi. Međutim, treba napomenuti da u vrijeme kad su ta pravila razvijena nije bilo podataka o toplo valjanim kutnicima niti o hladno oblikovanim kutnicima. Dakle, ovakav pristup može dovesti do pogrešne prakse projektiranja, jer ne pruža jasan odgovor na važno pitanje vezano uz primjenu odgovarajućih proračunskih krivulja za pouzdano i sigurno predviđanje otpornosti na izvijanja tlačno opterećenih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika međudjelovanjem aksijalne sile i dvoosnog savijanja. Kutnici opterećeni preko jednog kraka otkazuju zbog međudjelovanja uzdužne (aksijalne) sile i dvoosnog tlaka. Postupak projektiranja naveden u Dodatku BB EN 1993-1-1 [2] opisuje to međudjelovanje usvajanjem bezdimenzijskog efektivnog (modificiranog) omjera vitkosti umjesto geometrijskog, a pod uvjetom da su oba kraja tlačnog elementa zavarena ili povezana najmanje s dva vijka. Ovaj postupak podrazumijeva i ekscentričnost i ograničenja na krajevima elementa.

Za razliku od ugljičnog čelika, nehrđajući čelik ima pretežno nelinearni odnos naprezanja i deformacije bez jasno definirane granice popuštanja sa značajnim očvršćivanjem i duktilnošću. Postupno popuštanje između niskog naprezanja proporcionalnosti i granice popuštanja dovodi do omekšavanja materijala i posljedično utječe na konstrukcijski odgovor elemenata od nehrđajućeg čelika. Prema tome, proračunske krivulje izvijanja za tlačne elemente od nehrđajućeg čelika mogu se razlikovati u usporedbi s ekvivalentnim tlačnim elementima od ugljičnog čelika.

Ovaj rad prikazuje početnu fazu istraživanja koje se provodi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Beogradu. U radu su obrađeni tlačni elementi od nehrđajućeg čelika s toplo valjanim elementima s jednakim krakovima, izloženim centrikom tlaku. Prikazan je eksperimentalni program koji obuhvaća standardna vlačna ispitivanja materijala i istraživanja ponašanja tlačnih elemenata kod izvijanja metodom konačnih elemenata (FE). Dobiveni numerički rezultati korišteni su za procjenu točnosti metoda proračuna za projektiranje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima prema postojećim europskim specifikacijama [1, 2].

### 1.2. Stanje područja

U posljednjih nekoliko desetljeća provedena su značajna eksperimentalna i analitička istraživanja o ponašanju elemenata

od ugljičnog čelika kako bi se razvile sveobuhvatne smjernice za projektiranje sa širokim rasponom proizvoda i svojstava materijala, uključujući materijale od mekog čelika i čelika visoke čvrstoće. Dobivena opažanja na tlačnim elementima izvedenih kutnicima od ugljičnog čelika mogu poslužiti kao osnova za bolje razumijevanje konstrukcijskog ponašanja ekvivalentnih tlačnih elemenata od nehrđajućeg čelika. Takvi su rezultati korisni za kvantificiranje učinaka geometrijskih nesavršenosti, ekscentričnosti ili ograničenja na krajevima elemenata na čvrstoću tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika (eng. *Stainless Steel – SS*).

Prvo eksperimentalno istraživanje tlačnog kapaciteta kutnika proveli su Stang i Stricklenberg [4] 1924. Autori su ispitali niz od 170 standardnih valjanih kutnika s različitim spojevima na krajevima, kao što su kvadratni vijčani i vijčani s ravnim krajem. Wakabayashi i Nonaka [5] (1965.) proveli su eksperimentalno istraživanje na 57 toplo valjanih kutnika u kojima su mijenjali omjere ekscentričnosti i vitkosti, dok su ležajevi projektirani tako da se eliminira rotacija i uvijanje na krajevima uzorka. Kitipornchai i Lee [6] (1986.) ispitali su uzorke jednodijelnih ili dvodijelnih kutnika s jednakim i nejednakim krakovima sa zglobnim krajevima. U ovom istraživanju ispitano je 26 jednodijelnih tlačnih elemenata s jednakim i nejednakim krakovima te 16 dvodijelnih s jednakim i nejednakim krakovima. Zaključili su da su dobiveni eksperimentalni rezultati u razumnoj usklađenosti s teorijskim predviđanjima izračunanim primjenom pravila za projektiranje iz AS 1250-1981 [7] i AISC specifikacije [8]. Obje specifikacije imaju odgovarajuće sigurnosne granice za jednostruke i dvostruke tlačne elemente izvedene kutnicima. Al-Sayed i Bjorhovde [9] proveli su istraživanje na 12 zglobno oslonjenih tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od čelika. Adluri i sur. [10] (1992.) prikazali su ponašanje toplo valjanih kutnika (90° kutnici jednakih krakova savijenih na 60°), koji se obično rabe u sustavima konstrukcija jarbola. Provedena su ispitivanja cjelokupnog izvijanja pod koncentričnim opterećenjem. Naglašena je osjetljivost tih kutnika na izvijanje savijanjem i torzijom, te su dane preporuke za projektiranje. Posebna je pozornost usmjerena na određivanje sudjelujuće širine za izračunavanje omjera širine i debljine kraka koja se koristi za procjenu čvrstoće na aksijalno tlačno opterećenih elemenata. U svom radu, Adluri i Murty [11] (1996.) predstavili su rezultate eksperimentalnog istraživanja 26 kutnika od toplo valjanog čelika. Svi uzorci u ovom istraživanju ispitani su pod koncentričnim opterećenjem sa zglobnim rubnim uvjetima na krajevima. Mjerena su zaostala naprezanja i početne geometrijske nesavršenosti. Na temelju rezultata dobivenih u tom istraživanju i prikupljenih eksperimentalnih rezultata autori su razvili krivulje izvijanja za predviđanje krajnjeg opterećenja pri izvijanju [12]. Popović i sur. [13] (1999.) ispitali su niz hladno oblikovanih čeličnih elemenata izvedenih kutnicima, s fiksnim i zglobno spojenim krajevima. Autori su primijetili da na krajnji konstrukcijski odgovor tlačnih elemenata s vitkim kutnim presjecima snažno utječe smjer ekscentričnosti na krajevima tlačnog elementa. Veća razina tlačnih naprezanja

na uglu elementa, uzrokovana ekscentričnošću opterećenja koje se primjenjuje prema uglu, smanjuje razinu naprezanja na vrhovima krakova i dovodi do većeg tlačnog kapaciteta u usporedbi s odgovarajućim tlačnim elementima primjenom ekscentričnosti prema vrhovima krakova. Ben Young [14] (2004.) proveo je eksperimentalna ispitivanja na ravnim tlačnim elementima od hladno oblikovanog čelika između upetih krajeva. Kutni presjeci su bili oblikovani savijanjem pod prešom od limova izvedenih od konstrukcijskog čelika visoke čvrstoće. Ponašanje hladno oblikovanih kutnika s dodatnim profilacijama rubova krakova istraživali su Mohan i sur. [15] (2006.). Ispitivanje je uključivalo eksperimentalna ispitivanja elemenata, kao i panele dalekovodnih stupova u stvarnoj veličini, te naknadnu usporedbu s odgovarajućim analitičkim i numeričkim proračunima. Shifferaw i sur. [16] (2006.) ispitali su tlačne elemente od hladno oblikovanog čelika. Tlačni elementi su izvedeni iz jednodijelnih i dvodijelnih kutnika 60 x 60 x 2,38 mm. Young i Chen [17] (2008.) proveli su eksperimentalno istraživanje na asimetričnim tlačnim elementima izvedenim kutnicima s dodatnim profilacijama rubova krakova od hladno oblikovanog čelika. Eksperimentalna krajnja opterećenja tlačnih elemenata uspoređivana su s proračunskim čvrstoćama (ili proračunske otpornosti) izračunanim prema sjevernoameričkoj normi [18] za projektiranje konstrukcijskih elemenata od hladno oblikovanog čelika. Pokazalo se da su proračunske čvrstoće (ili proračunske otpornosti) općenito prilično konzervativne za nesimetrične tlačne elemente izvedenim kutnicima s dodatnim profilacijama rubova krakova od hladno oblikovanog čelika. Shi i sur. [19] (2011.) proveli su aksijalno tlačno ispitivanje na kutnicima s jednakim krakovima izvedenim od čelika visoke čvrstoće 420 MPa, što je uključivalo 15 tlačnih elemenata. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s odgovarajućim metodama projektiranja u ANSI / AISC 360-05 [20] i Eurokodu 3 [2]. Dobivene vrijednosti proračunskih čvrstoća (ili proračunske otpornosti) bile su veće od onih danih u ANSI / AISC 360-05 [20] i Eurokodu 3 [2], a povećanjem omjera širina-debljina razlike između vrijednosti čvrstoće (ili proračunske otpornosti) postale su veće. Ke Cao i sur. [21] (2015.) proveli su ispitivanje ponašanja LHS elemenata (veliki presjek i kutnik od čelika visoke čvrstoće) pod aksijalnim tlakom. Ispitivanje je obuhvatilo ukupno 90 tlačnih elemenata Q420. Rezultati ovog istraživanja pokazali su da su norme za projektiranje GB 50017-2003 [22] i Eurokodu 3 [2] konzervativni. U svom radu Bhilawe i Gupta [23] (2015.) objavili su rezultate tlačnih ispitivanja na jednodijelnim kutnicima s jednakim krakovima spojenim na čvorni lim. Istraživanje je obuhvatilo 12 uzoraka s jednim vijkom, 6 s dva vijka i 6 uzoraka sa zavarenim fiksnim krajevima. A. Landesmann i sur. [24] (2017.) izvijestili su o rezultatima eksperimentalnog istraživanja o ponašanju i kolapsu tlačnih elemenata izvedenim kutnicima od hladno oblikovanog čelika jednakih krakova s visokim vrijednostima vitkosti i u kontekstu razvoja i ocjene svojstava postupka temeljenog na DSM (eng. *Direct Strength Method – DSM*) postupku projektiranja.

Tablica 1. Sažetak baze podataka za ispitivanje izvijanja tlačnog elementa izvednog kutnikom

Referenca	Čelični materijal	Proizvod od čelika	Dimenzije presjeka [mm]	Br. ispitivanja
[4]	Ugljični čelik	Toplo valjani kutnik	min. L32x32x3,2 - max. L152x19	170
[5]	SS 41	Toplo valjani kutnik	L90x90x7	57
[6]	Meki ugljični čelik $f_y = 250$ MPa	Toplo valjani kutnik	min. L64x64x5 - max. L102x76x6,5	42
[9]	Meki ugljični mangan-čelik $f_y = 250$ MPa	Toplo valjani kutnik	L76x76x10, L101x101x16, L127x127x10, L152x101x20	12
[10]	$f_y = 333 - 475$ MPa	Schifflerized toplo valjani kutovi	min. L76x76x6,4 - max. L102x102x6,4	18
[11]	$f_y = 300$ MPa	Toplo valjani kutnik	min. L64x64x9,5 - max. L127x9,5	26
[13]	$f_y = 350$ MPa	Hladno oblikovani kutnik	L50x50x2,5, L50x50x4, L50x50x5	30
[14]	G500 i G450	Hladno oblikovani kutnik	L70x70x1,2, L70x70x1,5, L70x70x1,9	24
[15]	$f_y = 350$ MPa	Hladno oblikovani kutnik (dodatno ukršteni rub)	L75x75x30x3,15	11
[16]	$f_y = 375$ MPa	Hladno oblikovani kutnik	L60x60x2,38	12
[17]	G550 i G450	Hladno oblikovani kutnik (dodatno ukršteni rub)	L80x50x16x1, L80x50x16x1,5, L80x50x16x1,9	25
[19]	Q420	Toplo valjani kutnik	min. L125x125x8 - max. L200x200x14	15
[21]	Q420	Toplo valjani kutnik	min. L220x220x20 - max. L250x250x30	90
[23]	Meki čelik $f_y = 350$ MPa	Toplo valjani kutnik	L50x50x6, L60x60x5, L65x65x6	24
[24]	ZAR-345 meki čelik	Hladno oblikovani kutnik	min. L50x50x1,55 - max. L90x90x1,55	20
[25]	Austenitni nehrđ. čelik	Toplo valjani kutnik	L64x64x6,4	13

Samo nekoliko istraživanja bavilo se tlačnim kapacitetom tlačnih elemenata izvedenim kutnicima od nehrđajućeg čelika. De Menezes i sur. [25] (2019.) prikazali su eksperimentalne podatke za kutnike od austenitnog nehrđajućeg čelika pod tlakom. Ispitali su toplo valjane kutnike jednakih krakova L 64 x 64 x 6,4 mm u duljinama od 250 mm do 1500 mm. Ukupan broj uzoraka obuhvaćenih ovim istraživanjem bio je 13. Eksperimentalni rezultati korišteni su za kalibriranje razvijenog numeričkog modela čija se parametarska analiza sastojala od 22 različita presjeka. Autori su predložili nove vrijednosti faktora nesavršenosti  $\alpha$  i granične vitkosti jednake 0,60 odnosno 0,23 za tlačne elemente sa zdepastim kutnim presjecima s jednakim krakovima od toplo valjanog austenitnog nehrđajućeg čelika. Sažetak baze podataka za ispitivanje izvijanja tlačnih elemenata izvednih kutnicima prikazan je u tablici 1.

## 2. Eksperimentalno ispitivanje materijala

Eksperimentalno ispitivanje usredotočeno je na austenitni nehrđajući čelik EN 1.4301 (X5CrNi18-10). To je najčešća vrsta nehrđajućeg čelika koja se koristi u konstrukcijama. Vlačno ispitivanje epruveta provedeno je u laboratoriju za metale na Tehnološko-metalurškom fakultetu Sveučilišta u Beogradu. Ispitivanja su provedena na univerzalnom uređaju za ispitivanje Shimadzu AG-Xplus. Uzorci su ispitivani u skladu s EN ISO 6892-1 [26]. Tri ravna uzorka uzdužno su izrezana iz oba kraka od toplo valjanog uzorka (slika 2.).



Slika 2. Položaj vađenja uzoraka iz toplo valjanog kutnika

Sve su epruvete izrezane rezačem s vodenim mlazom kako bi se smanjilo zagrijavanje materijala tijekom njihove pripreme. Širina uzoraka u užem području bila je 12,5 mm. Za mjerenje uzdužnih naprezanja upotrijebljen je kalibrirani ekstenzometar duljine  $L_0 = 50$  mm. Usvojene brzine deformacije bile su 0,1 mm/min za početni dio ispitivanja do približno 1 % ukupne deformacije, nakon čega je brzina povećana na 2,0 mm/min. Slika 3. prikazuje tipičan uzorak prije i nakon ispitivanja.



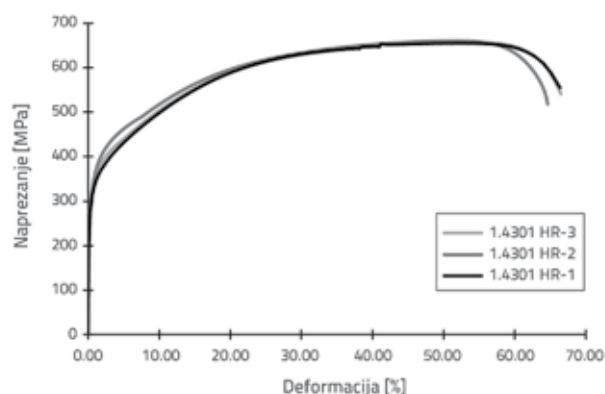
Slika 3. Uzorci od nehrđajućeg čelika prije i poslije ispitivanja

Tablica 2. Svojstva materijala iz ispitivanja uzoraka na vlak i prema normama EN 10088-5 i EN 1993-1-4 [1, 27]

Epruvete toplo valjanog kutnog presjeka EN 1.4301	$f_{0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{0.01}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{0.05}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{1.0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_u$ [%]	$\varepsilon_f$ [%]	Parametri očvršćivanja	
									$n$	$m$
Epruveta 1	281	200	244	350	655	199604	52	71	8	2,8
Epruveta 2	288	201	242	375	661	197161	51	65	8	3,5
Epruveta 3	294	203	248	363	658	199924	53	67	8	2,9
Srednja vrijednost	288	201	244	363	658	198896	52	67	8	3,1
EN 10088-5 i EN 1993-1-4	190	-	-	225	500-700	200000	-	45	6	-

Inženjerske krivulje naprezanje-deformacija dobivene za sva tri uzorka ispitana na vlak prikazane su na slici 4.

Svojstva materijala, uključujući i granicu popuštanja  $f_v$  što se koristi kao 0,2-postotno naprezanje za dokaz  $f_{0.2}$ , zatim maksimalna vlačna čvrstoća  $f_u$ , različita naprezanja za dokaze ( $\sigma_{0.01}$ ,  $\sigma_{0.05}$  i  $\sigma_{1.0}$ ), deformacija koja odgovara krajnjoj vlačnoj čvrstoći  $\varepsilon_u$ , ukupno naprezanje pri lomu  $\varepsilon_f$  i modul elastičnosti  $E$ , uključujući parametre deformacijskog očvršćivanja  $n$  i  $m$ , zabilježeni su i prikazani u tablici 2. Osim toga, u tablici 2. prikazana je usporedba njihovih prosječnih vrijednosti s ekvivalentnim nominalnim vrijednostima koje su navedene u normama EN 10088-5 [27] i EN 1993-1-4 [1]. U matematičkim interpretacijama nelinearnog ponašanja nehrđajućih čelika, parametri deformacijskog očvršćivanja  $n$  i  $m$  prikazuju stupanj nelinearnosti krivulje naprezanja-deformacije kroz dvije različite faze predstavljene s dvije modificirane Ramberg-Osgoodove jednadžbe [28]. Eksperimentalni parametri deformacijskog očvršćivanja  $n$  i  $m$  (tablica 2.) dobiveni su pomoću računalnog programa temeljenog na metodi regresije najmanjih kvadrata [29], tako da svaka eksperimentalna krivulja naprezanja-deformacije blisko odgovara prediktivnim krivuljama koje su razvile Ramberg-Osgoodove jednadžbe [28], minimizirajući pogrešku između njih.



Slika 4. Inženjerske krivulje naprezanje-deformacija

Iz tablice 2. može se vidjeti da prosječna izmjerena granica popuštanja premašuje nazivnu vrijednost s prekoračenjem od 52 %. Prema EN 10088-5 [27], granica popuštanja  $f_v$  i krajnja vlačna čvrstoća  $f_u$  odnose se na minimalne specificirane

vrijednosti za 0,2-postotnu dokaznu čvrstoću  $R_{p0.2}$  i vlačnu čvrstoću  $R_m$  dobivenu za materijale od nehrđajućeg čelika u žarenim uvjetima. Žarenje je proces toplinske obrade koji se primjenjuje kako bi se osigurala optimizirana otpornost na koroziju, mekoća i duktilnost materijala, te kako bi se smanjili rezidualni učinci proizvodnih procesa kao što su zavarivanje ili savijanje. Međutim, austenitni nehrđajući čelici ne mogu se očvršnuti toplinskom obradom. Granica popuštanja  $f_{0.2} = 190$  MPa je relativno niska (tablica 2.) u žrenom stanju. S druge strane, razine čvrstoće austenitnih nehrđajućih čelika mogu se znatno poboljšati hladnom obradom tijekom postupka izrade s obzirom na njihove visoke parametre deformacijskog očvršćivanja. Dakle, specificirane nominalne vrijednosti [1, 27] su konzervativne za profile koji se podvrgavaju daljnjim postupcima dorade nakon toplog valjanja, kao što je izravnavanje, hladno izvlačenje ili strojna obrada dijelova.

### 3. Otpornost tlačnih elemenata izvedenih kutnicima prema Eurokodu 3

Metoda projektiranja za izračun otpornosti na izvijanje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima, koja je dana u normama EN 1993-1-1 [2] i EN 1993-1-3 [3], temelji se na teoretskom rješenju elastične stabilnosti tlačnih monosimetričnih i asimetričnih presjeka tankostijenih profila [30]. U slučaju tlačnih elemenata sa zglobnim spojevima na kraju, najniže opterećenje elastičnog izvijanja  $N_{cr}$  je najniže rješenje izraza (1):

$$(N_{cr,u} - N_{cr})(N_{cr,v} - N_{cr})(N_{cr,T} - N_{cr})i_0^2 - N_{cr}^2 \left[ (N_{cr,u} - N_{cr})v_0^2 + (N_{cr,v} - N_{cr})u_0^2 \right] = 0 \quad (1)$$

gdje su  $N_{cr,u}$  i  $N_{cr,v}$  elastične kritične sile za izvijanje savijanjem oko jače  $u-u$  i slabije  $v-v$  glavne osi, dok je  $N_{cr,T}$  elastična kritična sila za torzijsko izvijanje:

$$N_{cr,u} = \frac{\pi^2 E I_u}{L^2} \quad (2)$$

$$N_{cr,v} = \frac{\pi^2 E I_v}{L^2} \quad (3)$$



$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( G I_t + \pi^2 \frac{E I_w}{L^2} \right) \quad (4)$$

U izrazima (2) do (4),  $I_u$  i  $I_v$  su drugi momenti površine drugog stupnja oko jače i slabije glavne osi poprečnog presjeka,  $I_t$  je torzijska konstanta,  $I_w$  je konstanta krivljenja,  $L$  je duljina izvijanja,  $E$  je modul elastičnosti, a  $G$  je modul posmika.

U izrazu (1)  $i_0^2$  se određuje kako slijedi:

$$i_0^2 = i_v^2 + i_u^2 + v_0^2 + u_0^2 \quad (5)$$

gdje su  $i_u$  i  $i_v$  radijusi tromosti oko jače i slabije glavne osi, a  $v_0$  i  $u_0$  su koordinate središta posmika u odnosu na težište poprečnog presjeka.

Za tlačne elemente izvedene kutnicima jednakih krakova,  $v_0 = 0$ , a pojednostavljenje izraza (1) je:

$$(i_0^2 - u_0^2) N_{cr}^2 - i_0^2 (N_{cr,u} + N_{cr,T}) N_{cr} + i_0^2 N_{cr,u} N_{cr,T} = 0 \quad (6)$$

gdje je:

$$N_{cr} = \min(N_{cr,v}; N_{cr,T}) \quad (7)$$

a  $N_{cr,TF}$  predstavlja elastičnu silu izvijanja savijanjem:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,u}}{2 \left( 1 - \frac{u_0^2}{i_0^2} \right)} \left[ 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}} - \sqrt{\left( 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}} \right)^2 - 4 \left( 1 - \frac{u_0^2}{i_0^2} \right) \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}}} \right] \quad (8)$$

Nakon što je određena elastična kritična sila  $N_{cr}$ , tlačna otpornost  $N_{b,Rd}$  je utvrđena iz dobro poznate Perry-Robertsonove jednadžbe primjenom linearnog izraza između faktora nesavršenosti i bezdimenzijske vitkosti elementa [2].

#### 4. Analiza konačnih elemenata

U ovom odjeljku prikazana je analiza konačnih elemenata (FEA), koncentrirana na zglobno oslonjene tlačne elemente izvedene kutnicima jednakih krakova od nehrđajućeg čelika s nazivnim dimenzijama poprečnog presjeka 60 x 6 mm (širina krakova x debljina). Da bi se procijenila prikladnost krivulje izvijanja  $b$  koja služi za projektiranje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima jednakih krakova od toplo valjanog ugljičnog čelika [2], za projektiranje ekvivalentnih tlačnih elemenata od nehrđajućeg čelika i za osiguravanje glatkog prijelaza elastičnog na neelastično izvijanje, odabrane su dužine FE modela kako bi se pokrio širok raspon ukupne geometrijske vitkosti. Analizirani raspon ukupnih omjera vitkosti oko slabije glavne osi kutnog profila je 15-256. Osim toga, provedene su i parametarske analize osjetljivosti kako bi se ispitali utjecaji početnih nesavršenosti, nelinearnosti materijala i zaostalih naprezanja na tlačni kapacitet elemenata izvedenih kutnicima od toplo valjanog nehrđajućeg čelika. Geometrijski

i materijalno nelinearna analiza provedena je programskim paketom ABAQUS FE [31] primjenjujući njegovo eksplicitno dinamičko rješenje, jer je već uspješno korištena za simulacije ispitivanja izvijanja tlačnih elemenata [32].

#### 4.1. Geometrija, rubni uvjeti i mreža konačnih elemenata

Tlačni elementi izvedeni kutnicima od toplo valjanog čelika modelirani su s njihovom nominalnom geometrijom. Za krakove kutne primjenjuje se osmeročvorni heksaedarski čvrsti "solid" element s reduciranom integracijom (C3D8R), a za područje ugla šesterokutni klinasti elementi (C3D6), jer oni nude dobre rezultate za razumno vrijeme izračuna. Globalna veličina elementa od 2 mm primjenjuje se za svaki model FE s najmanje tri elementa kroz debljinu krakova kako bi se pravilno uzela u obzir njihova krutost na savijanje. Zone ležajeva i opterećenja na krajevima elemenata kinematički su ograničene na referentne točke kako bi se modeliralo ponašanje zglobno oslonjenih tlačnih elemenata. Referentne točke postavljene su na težištima krajnjih presjeka tlačnih elemenata. Opterećenje do sloma primjenjuje se kontrolom pomaka na referentnu točku u zoni opterećenja. Geometrija, mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti FE modela koji predstavlja ispitivanje izvijanja tlačnog elementa prikazani su na slici 5.



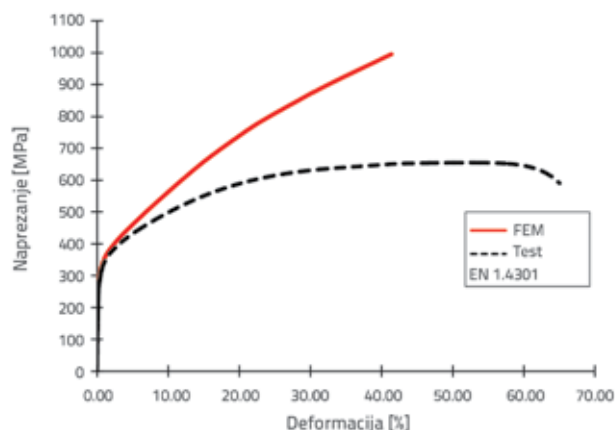
Slika 5. Geometrija FE modela i rubni uvjeti

#### 4.2. Modeliranje materijala

Kako bi se uzelo u obzir nelinearno ponašanje materijala, mehanička svojstva dobivena ispitivanjem prve vlačne epruvete (tablica 2.) dodjeljuju se svakom FE modelu. Upotrebljava se plastičnost s izotropnim otvrdnjivanjem s početnim modulom elastičnosti  $E = 200$  GPa i Poissonovim omjerom  $\nu = 0,3$ . Inženjerska krivulja naprezanja-deformacije pretvara se u pravu krivulju naprezanja-deformacije kao ulaz u model plastičnosti u ABAQUS-u, koristeći izraze (9) i (10), gdje su  $\sigma_{nom}$  i  $\epsilon_{nom}$  tehnička naprezanja i deformacije,  $E$  je modul elastičnosti,  $\sigma_{true}$  i predstavljaju pravo naprezanje i logaritamski plastično naprezanje. Slika 6. prikazuje inženjersku krivulju naprezanja-deformacija dobivenu ispitivanjem prve vlačne epruvete i pripadajućom pravom krivuljom naprezanja-deformacije koja se uvodi u FE modele.

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \quad (9)$$

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - \sigma_{true} / E \quad (10)$$

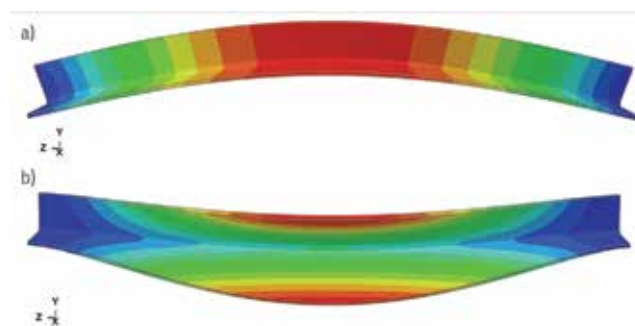


Slika 6. Inženjerska i stvarna krivulja naprezanja-deformacija

### 4.3. Geometrijske nesavršenosti

Superpozicija početnih geometrijskih nesavršenosti u obliku najnižeg ukupnog oblika savijanja s amplitudom  $\delta_0 = L / 1000$  (0,1 % dužine elementa  $L$ ) i najnižim torzijskim oblikom izvijanja s amplitudom  $\varphi_0 = t / 10$  (10 % debljine kraka  $t$ ) dodijeljeno je svim FE modelima. Ovaj se pristup temelji na djelima Landesmann i sur. [33] te Dinisa i Camotima [34] koji su pokazali da usvojene raspodjele i vrijednosti amplitude početnih geometrijskih nesavršenosti mogu u dovoljnoj mjeri obuhvatiti ponašanje ugljičnih čeličnih tlačnih elemenata izvedenih kutnicima s razumnom točnošću u odnosu na eksperimentalne rezultate. Vrijednost amplitude  $L / 1000$  početne nesavršenosti odgovara 75 % najvećih dopuštenih nesavršenosti za bitna dopuštena odstupanja prema EN 1090-2 [35], kako je navedeno u Dodatku C EN 1993-1-5 [36]. Međutim, valja napomenuti da europska norma koja određuje dopuštena odstupanja dimenzija oblika i mase kutnika od toplo valjanih konstrukcijskih čelika, EN 10056-2 [37] ograničava dopušteno odstupanje ravnosti na 0,4 %  $L$  za duljinu kraka manju ili jednaku 150 mm. Dakle, za razmatrani kutni profil 60 x 6 mm usvojena amplituda

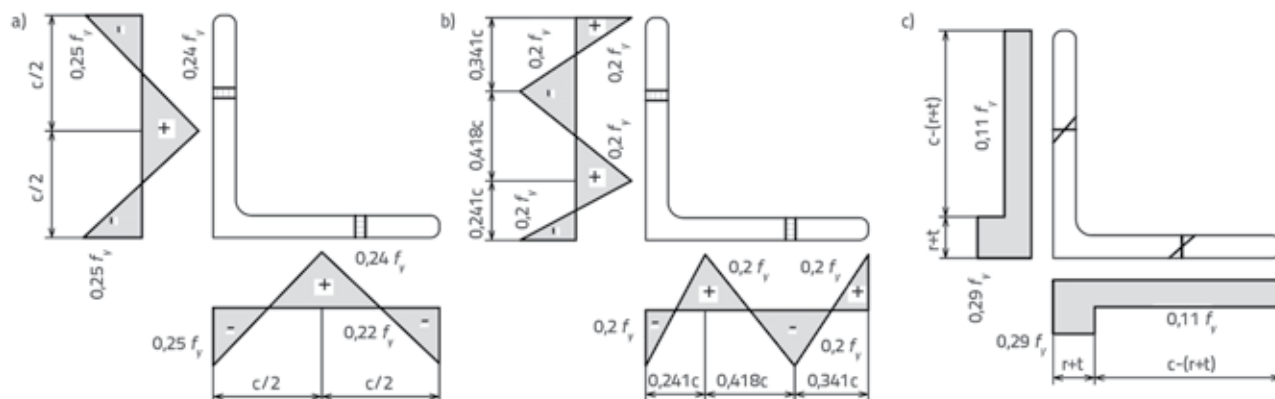
početne nesavršenosti odgovara 25 % maksimalno dopuštene tolerancije u skladu s EN 10056-2 [37]. Svaki oblik izvijanja se određuje pomoću preliminarne analize vlastitih vrijednosti linearne analize izvijanja (eng. *Linear Buckling Analysis* - LBA), koja se izvodi s istom mrežom i koristi se za provedbu naknadne nelinearne analize izvijanja. Vlastite vrijednosti modela dobivene linearnom analizom izvijanja prikazane su na slici 7. S obzirom na to da predznak početne nesavršenosti nije izričito definiran u specifikacijama [35, 37], a nije vidljiv bez prethodnih mjerenja, primijenjena su oba smjera raspodjele nesavršenosti u nelinearnoj analizi izvijanja: u pozitivnim smjerovima koji se odnose na deformirane oblike izvijanja FE modela dobivenim u LBA i u negativnom smjeru koji su suprotni smjeru deformiranih oblika izvijanja FE modela u LBA.



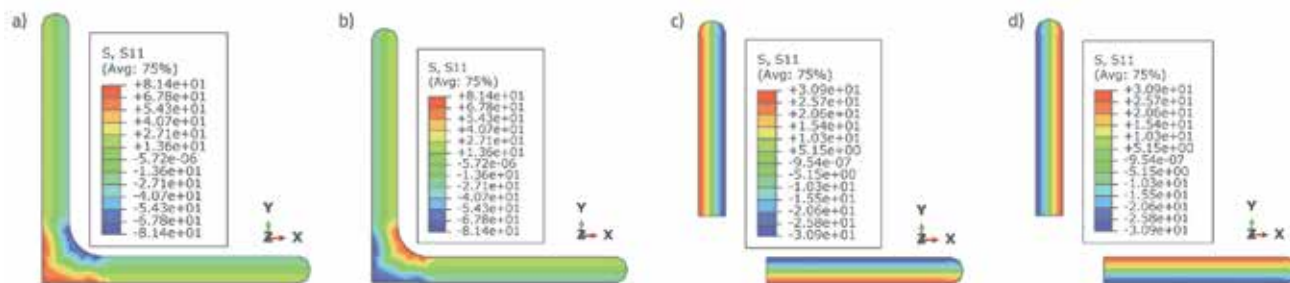
Slika 7. Vlastite vrijednosti (vlastiti oblici): a) oblik izvijanja savijanjem; b) oblik izvijanja savijanjem i torzijom

### 4.4. Zaostala naprezanja

Veličina i raspodjela zaostalih naprezanja u konstrukcijskim elementima značajno ovise o proizvodnom procesu. Razina zaostalih naprezanja u profilima od toplo valjanog nehrđajućeg čelika ovisi o temperaturi žarenja, uvjetima hlađenja, stupnju hladne obrade, geometriji poprečnog presjeka i vrsti nehrđajućeg čelika. Razlike između materijalnih i toplinskih svojstava ugljičnog čelika i nehrđajućeg čelika uzrokuju razlike u veličini i



Slika 8. Modeli raspodjele zaostalog naprezanja (RS) kutnika od toplo valjanog materijala s jednakim krakovima, pretpostavljeni model zaostalog naprezanja (RS): a) u 3 točke model s ujednačenom raspodjelom [38]; b) u 4 točke model s ujednačenom raspodjelom [39]; c) model savijanja s linearnom raspodjelom [41]



Slika 9. Zaostala naprezanja (RS) primijenjena u FE modelu: a) raspodjela  $RS^+$  kroz debljinu profila; b) raspodjela  $RS^-$  kroz debljinu profila; c) raspodjela  $RS^+$  kroz debljinu kraka; d) raspodjela  $RS^-$  kroz debljinu kraka

raspodjeli zaostalih naprezanja u konstrukcijskim elementima tih dvaju materijala. Koeficijent toplinskog širenja austenitnog nehrđajućeg čelika veći je od koeficijenta konstrukcijskog ugljičnog čelika, dok je toplinska vodljivost manja, što dovodi do većih zaostalih naprezanja u odnosu na ugljični čelik. Za kutnike od ugljičnog čelika provedena su brojna istraživanja utjecaja zaostalih naprezanja.

Za izradu krivulja izvijanja ECCS-a [38] primijenjen je linearni pretpostavljeni model u tri točke raspodjele zaostalih naprezanja u kutnicima jednakih krakova od toplo valjanog ugljičnog čelika, prikazan na slici 8a. Raspodjela je simetrična s tlačnim naprezanjima na sjecištu krakova i na njihovim krajevima, uravnotežujući vlačna naprezanja na sredini dužine krakova. Paralelno, slika 8b pokazuje linearni pretpostavljeni model s četiri točke koji se temelji na opsežnim mjerjenjima zaostalih naprezanja u velikim kutnicima od ugljičnog čelika [39]. U oba pretpostavljena modela pretpostavlja se da je raspodjela zaostalih naprezanja ravnomjerna po cijeloj debljini presjeka s dominantnom komponentom membranskog stanja naprezanja. Dok su obrasci zaostalih naprezanja u konstrukcijskim elementima od ugljičnog čelika opsežno proučavani, podaci o zaostalim naprezanjima u konstrukcijskim elementima od nehrđajućeg čelika su ograničeni. Cruise i Gardner [40, 41] proveli su opsežan eksperimentalni program za kvantificiranje raspodjele zaostalih naprezanja u profilima od toplo valjanog i hladno oblikovanog nehrđajućeg čelika, uključujući toplo valjane uzorke jednakih krakova s nominalnim dimenzijama 50 x 3 mm. Svi elementi su izrađeni od austenitnog nehrđajućeg čelika EN 1.4301. Istraživački pristup Cruisea i Gardnara [40, 41] uzima u obzir ukupno zaostalo naprezanje što uključuje i membransku i komponentu savijanja. Membranska komponenta odgovara tlačnom ili vlačnom uzdužnom deformiranju, a komponenta savijanja linearno se mijenja kroz debljinu presjeka. Međutim, autori su otkrili da su i komponente naprezanja zbog savijanja i membranskog zaostalog naprezanja relativno male u slučaju kutnika od toplo valjanog nehrđajućeg čelika. Na temelju eksperimentalnih rezultata predložen je jednostavan pretpostavljeni model za zaostala naprezanja zbog savijanja, uz pretpostavku njihove linearne varijacije kroz debljinu ili s vlačnim ili tlačnim vrijednostima na vanjskoj površini kutnog profila. Predloženi model temeljen na srednjim vrijednostima izmjerenih naprezanja [41] prikazan je na slici 8.c. Taj pretpostavljeni model

indirektno se primjenjuje u svakom FE modelu ekvivalentnim temperaturnim deformacijama kao početno stanje analize nelinearnog izvijanja kako bi se prikazalo ravnotežno stanje naprezanja u prvom koraku izračuna opterećenja. Formulacija unaprijed definiranih analitičkih polja služi za dodjeljivanje željenih vrijednosti naprezanja i različitih predznaka kroz debljinu krakova. Vrijednosti zaostalih naprezanja zbog savijanja od  $0,29 = f_v = 81,5 \text{ MPa}$  i  $0,11 = f_v = 30,9 \text{ MPa}$  postavljene su u uglovima i ravnim dijelovima. Razmatraju se dva suprotna obrasca, pozitivna raspodjela s tlačnim naprezanjima na vanjskoj površini presjeka ( $RS^+$ ), te negativna raspodjela s vlačnim naprezanjima na vanjskoj površini presjeka ( $RS^-$ ). Iz slike 9. se vidi da je postignuta vrlo dobra primjena zaostalih naprezanja u FE modelu.

## 5. Rasprava o rezultatima

### 5.1. FE analiza osjetljivosti

U ovom dijelu uspoređene su tlačne otpornosti tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika dobivenih u studiji osjetljivosti FE s tlačnim kapacitetima ekvivalentnih početno ravnih tlačnih elemenata bez zaostalih naprezanja (tablica 3.). Kao što je već spomenuto, studija osjetljivosti FE uzima u obzir odvojene i kombinirane učinke početnih geometrijskih nesavršenosti i zaostalih naprezanja na krajnji odgovor izvijanja tlačnih elemenata od nehrđajućeg čelika. Tablica 4. kvantificira smanjenje otpornosti tlačnih elemenata u početnom stanju savršenih tlačnih elemenata uzrokovano utjecajima odvojenih i kombiniranih djelovanja geometrijskih nesavršenosti (eng. *geometric imperfections* - GI) i zaostalih naprezanja (eng. *residual stresses* - RS) koji su odgovorni za promjenu predznaka njihove raspodjele.

Slijedi kratka analiza dobivenih rezultata. Krajnji konstrukcijski odgovor FE modela uključuje lokalno izvijanje krakova kutnika, oblik izvijanja savijanjem i torzijom uslijed kombiniranog uvijanja i progib zbog savijanja oko glavne osi, te oblik izvijanja savijanjem oko slabije glavne osi.

Pojedinačno djelovanje zaostalih naprezanja malo utječe na tlačnu otpornost tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika u području niske i srednje vitkosti do  $\lambda_v = 60$ . Međutim, ti učinci su značajniji u području velikih vitkosti. Maksimalno smanjenje krajnje otpornosti na izvijanje



Tablica 3. FE krajnja opterećenja izvijanja uzimajući u obzir početne geometrijske nesavršenosti (GI) i zaostala naprezanja (RS)

FE modeli	FE krajnja opterećenja izvijanja $N_{b,u,FEA}$ [kN]								
Dužina [mm]	bez GI i RS	Pojedinačni utjecaji GI i RS				Kombinirani utjecaji GI i RS			
		bez GI i RS <sup>+</sup>	bez GI i RS <sup>-</sup>	bez RS i s GI <sup>+</sup>	bez RS i s GI <sup>-</sup>	s GI <sup>+</sup> i RS <sup>+</sup>	s GI <sup>+</sup> i RS <sup>-</sup>	s GI <sup>-</sup> i RS <sup>+</sup>	s GI <sup>-</sup> i RS <sup>-</sup>
		$N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,2}$	$N_{b,u,FEA,3}$	$N_{b,u,FEA,4}$	$N_{b,u,FEA,5}$	$N_{b,u,FEA,6}$	$N_{b,u,FEA,7}$	$N_{b,u,FEA,8}$
180	231,8	231,1	232,5	207,2	207,2	207,4	207,4	207,1	207,1
250	210,8	210,5	211,1	201,4	201,4	201,4	201,4	201,4	201,4
300	198,7	198,7	198,7	199,5	190,4	199,6	199,5	190,4	190,5
400	181,2	180,9	181,5	176,9	171,9	177,1	176,8	171,6	172,3
500	167,4	168,2	166,5	160,6	157,2	160,6	161,0	158,1	156,9
600	157,0	155,7	159,1	147,6	144,8	147,6	147,5	144,4	145,2
650	151,3	151,2	154,9	141,9	138,8	142,1	140,8	137,5	137,5
700	148,2	147,0	155,6	135,6	132,8	136,3	134,9	131,4	134,2
800	146,2	142,8	149,3	125,5	122,5	124,3	127,0	124,6	121,0
1000	139,5	131,9	141,6	105,7	103,2	108,9	104,1	101,7	105,6
1200	117,3	105,9	115,6	85,5	84,0	87,5	83,0	81,1	86,8
1400	103,8	87,6	92,8	68,4	66,8	71,6	66,7	65,9	70,3
1600	95,5	76,9	81,4	56,8	55,5	60,2	55,2	54,8	59,6
1800	89,2	66,0	70,2	47,5	46,4	51,6	45,2	44,3	50,4
2000	84,3	64,8	68,2	40,4	39,4	43,2	38,2	37,6	41,5
2200	79,9	54,6	57,8	34,8	34,0	39,0	32,9	32,3	37,8
2400	77,1	48,7	50,8	30,7	30,0	36,8	26,3	25,4	36,3
2800	74,1	45,9	48,7	25,3	24,6	28,0	22,5	22,3	27,7
3000	72,5	42,5	46,1	23,5	22,9	26,6	21,5	21,3	25,7

Tablica 4. Kvantifikacija utjecaja početnih GI i RS na FE krajnja opterećenja izvijanja

FE modeli	Omjeri FEA krajnjih opterećenja izvijanja								
Dužina [mm]	Omjer vitkosti $\lambda_v$	Pojedinačni utjecaji GI i RS				Kombinirani utjecaji GI i RS			
		$N_{b,u,FEA,2} / N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,3} / N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,4} / N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,5} / N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,6} / N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,7} / N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,8} / N_{b,u,FEA,1}$	$N_{b,u,FEA,9} / N_{b,u,FEA,1}$
180	15	1,00	1,00	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
250	21	1,00	1,00	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
300	26	1,00	1,00	0,99	0,96	1,00	1,00	0,96	0,96
400	34	1,00	1,00	0,98	0,95	0,98	0,98	0,95	0,95
500	43	1,00	0,99	0,96	0,94	0,96	0,96	0,94	0,94
600	51	0,99	1,01	0,94	0,92	0,94	0,94	0,92	0,93
650	55	1,00	1,02	0,94	0,92	0,94	0,93	0,91	0,91
700	60	0,99	1,05	0,92	0,90	0,92	0,91	0,89	0,91
800	68	0,98	1,02	0,86	0,84	0,85	0,87	0,85	0,83
1000	85	0,95	1,02	0,76	0,74	0,78	0,75	0,73	0,76
1200	102	0,90	0,98	0,73	0,72	0,75	0,71	0,69	0,74
1400	119	0,84	0,89	0,66	0,64	0,69	0,64	0,64	0,68
1600	136	0,81	0,85	0,59	0,58	0,63	0,58	0,57	0,62
1800	153	0,74	0,79	0,53	0,52	0,58	0,51	0,50	0,56
2000	170	0,77	0,81	0,48	0,47	0,51	0,45	0,45	0,49
2200	187	0,68	0,72	0,44	0,43	0,49	0,41	0,40	0,47
2400	204	0,63	0,66	0,40	0,39	0,48	0,34	0,33	0,47
2800	239	0,62	0,66	0,34	0,33	0,38	0,30	0,30	0,37
3000	256	0,59	0,64	0,32	0,32	0,37	0,30	0,29	0,35

početno savršenih tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika ( $\lambda_v = 256$ ) pod utjecajem odvojenog djelovanja zaostalih naprezanja iznosi 41 %. Pozitivna raspodjela zaostalih naprezanja (RI +) uzrokuje manju otpornost na izvijanje tlačnog elementa u usporedbi s njihovom negativnom raspodjelom (RI<sup>-</sup>), s razlikama do 8 % (tablica 3.).

Kao što se i očekivalo, početne geometrijske nesavršenosti više negativno utječu na otpornost na izvijanje u usporedbi sa zaostalim naprezanjima. Oblik sinusnog vala početnih geometrijskih nesavršenosti s amplitudom  $L / 1000$  na srednjoj visini elementa i s krajevima krakova na konkavnoj strani (GI<sup>-</sup>) smanjuje krajnju otpornost savršeno ravnog tlačnog elementa od 4 % u području male vitkosti ( $\lambda_v = 21$  do 26), do 68 % u području velike vitkosti ( $\lambda_v = 256$ ). Iako simetrični oblik geometrijskih nesavršenosti s pozitivnim predznakom (GI<sup>+</sup>) uzrokuje neznatno manje smanjenje tlačne otpornosti početno savršenog tlačnog elementa izvedenog kutnikom u odnosu na GI<sup>-</sup> raspodjelu, te razlike su zanemarive, do 2 %.

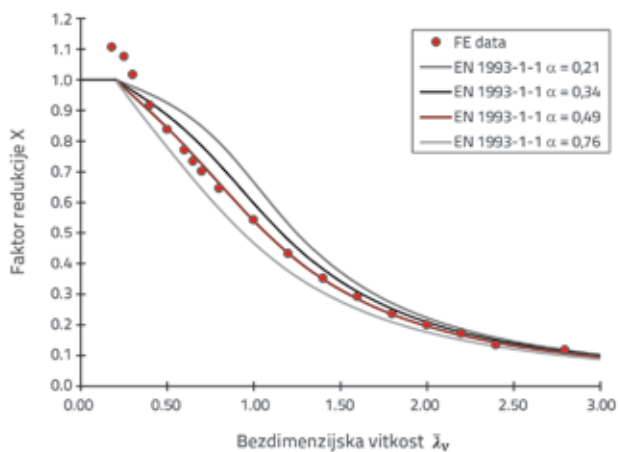
Kombinirani učinci zaostalih naprezanja i početne nesavršenosti ne dosežu zbroj njihovih pojedinačnih učinaka na otpornost na izvijanje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika u cijelom promatranom rasponu vitkosti. Međutim, iz tablice 4. se može vidjeti da ti štetni učinci nisu značajno veći od onih uzrokovanih pojedinačnim djelovanjem početnih geometrijskih nesavršenosti. Istraživanje pokazuje da interakcijski učinci zaostalih naprezanja (RS<sup>+</sup>) i geometrijskih nesavršenosti (GI<sup>-</sup>) dovode do najniže vrijednosti krajnjih opterećenja izvijanja. Treba napomenuti da je za ovaj slučaj deformirani oblik tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika kod krajnjeg graničnog stanja jednak deformiranom obliku uzrokovanom pojedinačnim djelovanjem i GI<sup>-</sup> i RS<sup>+</sup>.

## 5.2. Usporedba FE otpornosti na izvijanje s projektiranom otpornosti na izvijanje

Za procjenu prikladnosti pretpostavljene metode za projektiranje centrično tlačno opterećenih elemenata izvedenih kutnicima prema europskim normama EN 1993-1-4 [1] i EN 1993-1-1 primjenjuju se minimalne vrijednosti krajnjeg opterećenja izvijanja iz FE (tablica 3.), [2]. Svojstva materijala dobivena vlačnim ispitivanjem prve epruvete (tablica 2.), ograničavajući vitkosti  $\lambda_0 = 0,2$ , i parcijalni faktor  $\gamma_{M1} = 1,0$  primjenjuju se u izračunima otpornosti na izvijanje  $N_{b,u,EC}$ . Ovisno o ukupnoj vitkosti, predviđeno otkazivanje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima od nehrđajućeg čelika nastaje zbog izvijanja savijanjem i torzijom ili izvijanja savijanjem oko slabije glavne osi.

Grafička usporedba krivulja izvijanja iz Eurokoda i normaliziranih FE opterećenja izvijanja prikazana je na slici 10. FE krajnja opterećenja su normalizirana dijeljenjem s maksimalnim opterećenjem  $Af_v$  (squash load) te su nacrtane u odnosu na bezdimenzijsku vitkost tlačnog elementa. Slika 10. pokazuje da većina FE rezultata leži između krivulja c i b, te su ove krivulje

odabrane za procjenu kao reprezentativne za predviđanje izvijanja savijanjem tlačnih elemenata izvednim kutnicima jednakih kutova od nehrđajućeg čelika. Osim toga, kako bi se procijenila točnost metode za projektiranje kod izvijanja savijanjem i torzijom, koristi se krivulja izvijanja b kako je navedeno u EN 1993-1-4 [1].



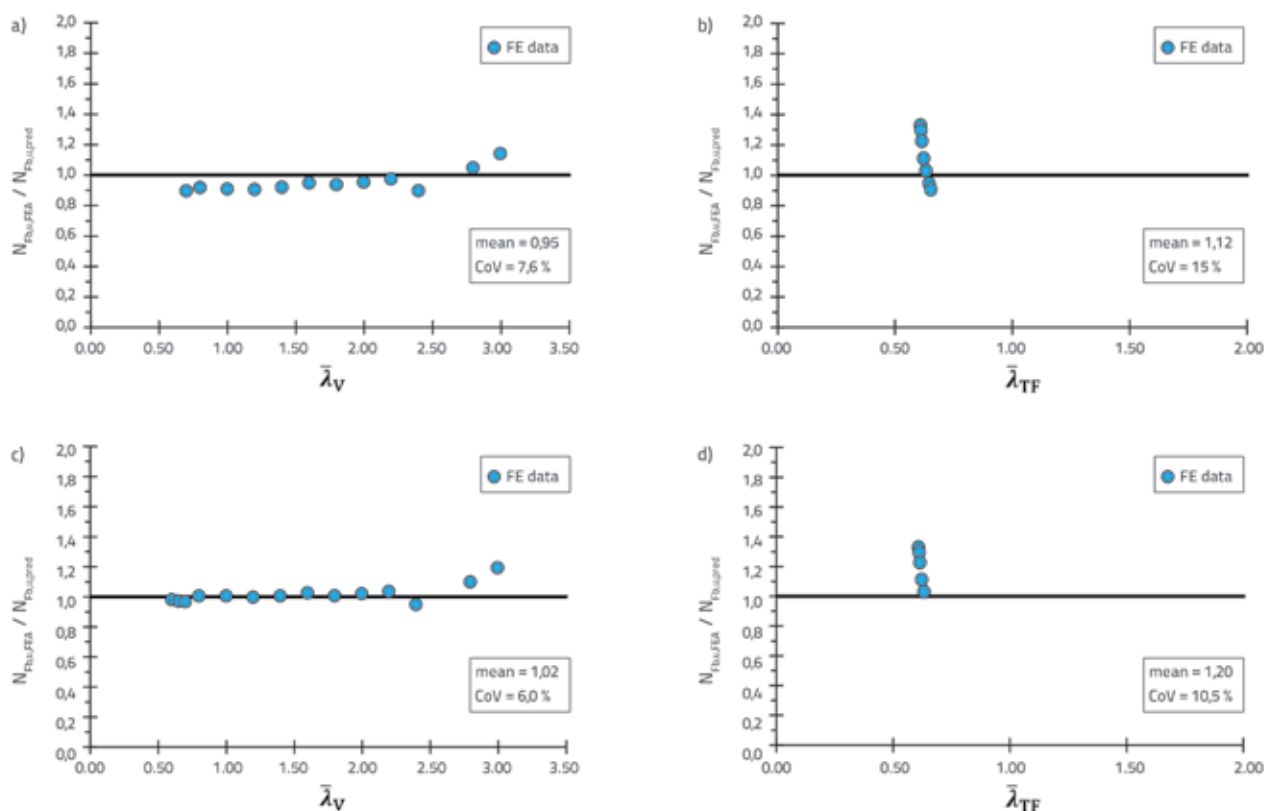
Slika 10. Usporedba između normaliziranih FE rezultata i krivulja izvijanja prema Eurokodu 3

Treba naglasiti da promjena krivulje izvijanja za izračune krajnjih opterećenja za izvijanje savijanjem također utječe na predviđanje otkazivanja izvijanjem savijanjem i torzijom. Usporedbe između FE rezultata i odabranih krivulja prikazane su na slici 11. Ako je krivulja b odabrana za izvijanje savijanjem, srednji omjer između FE opterećenja u odnosu na predviđeni  $N_{Fb,u,FE} / N_{Fb,u,EC}$  je 0,95, a koeficijent varijacije (CoV) je 7,6 %, dok je u slučaju izvijanja savijanjem i torzijom srednji omjer između FE opterećenja u odnosu na predviđeni  $N_{TFb,u,FE} / N_{TFb,u,EC}$  1,12, a CoV 15 %. Međutim, krivulja c blisko prati trend FE točaka i sigurnije predstavlja ponašanje elemenata kod savijanja izvedenih kutnicima jednakih krakova od nehrđajućeg čelika: srednji omjer  $N_{Fb,u,FE} / N_{Fb,u,EC}$  iznosi 1,02, a CoV 6,0 %. Prema tome, dobiva se manji raspon podataka za izvijanje savijanjem i torzijom, srednji omjer  $N_{TFb,u,FE} / N_{TFb,u,EC}$  je 1,2, a CoV 10,5 %.

## 6. Zaključak

FE istraživanje tlačnih elemenata izvedenih kutnicima s jednakim krakovima od austenitnog toplo valjanog nehrđajućeg čelika provedeno je na temelju eksperimentalnog nelinearnog modela materijala i predviđanja zaostalih naprezanja [41].

Provedena je FE analiza osjetljivosti kako bi se kvantificirala razina pojedinačnih i kombiniranih učinaka početnih geometrijskih nesavršenosti i zaostalih naprezanja s obzirom na različite predznake njihove raspodjele. Utvrđeno je da kombinacija početnih geometrijskih nesavršenosti u smjeru suprotnom od najnižeg oblika izvijanja dobivenog u LBA, te uzorak zaostalih naprezanja s vlačnim naprezanjima na vanjskoj



Slika 11. Usporedba između proračunskih predviđanja i FE rezultata, usporedba FE i proračunskih opterećenja izvijanja savijanjem: a) kad je izabrana krivulja *b* za oblik izvijanja savijanjem; b) i torzijom kad je izabrana krivulja *b* za oblik izvijanja savijanjem; c) kad je izabrana krivulja *c* za oblik izvijanja savijanjem; d) i torzijom kad je izabrana krivulja *c* za oblik izvijanja savijanjem

površini kutnog profila dovodi do najniže vrijednosti krajnjeg opterećenja izvijanja tlačnih elemenata izvedenih kutnicima jednakih krakova od nehrđajućeg čelika. Međutim, kombinirani učinci slabljenja zbog geometrijskih nesavršenosti i zaostalih naprezanja nisu znatno veći u usporedbi s pojedinačnim utjecajima geometrijskih nesavršenosti.

FE rezultati korišteni su za procjenu točnosti postojećih odredbi za tlačne elemente prema Eurokodu 3 [1, 2], uključujući prikladnost krivulja izvijanja *b* i *c*. Istraživanje je pokazalo da krivulja izvijanja *c* dosljednije i sigurnije predstavlja nelinearno ponašanje i predviđanja konačnog kapaciteta tlačnih elemenata izvedenih kutnicima s jednakim krakovima od toplo valjanog nehrđajućeg čelika u usporedbi s krivuljom *b* koja se primjenjuje za projektiranje ekvivalentnih tlačnih elemenata od ugljičnog čelika. S obzirom na krivulju *c*, srednji omjer  $N_{b,u,FE} / N_{b,u,EC}$  je 1,02, a CoV 6,0 %, dok je za krivulju izvijanja *b* srednji omjer  $N_{b,u,FE} / N_{b,u,EC}$  je 0,95, a CoV 7,6 %.

Baza podataka razvijena u ovom istraživanju ograničena je na definiranje jasno iskazanih odredbi projektiranja. To upućuje na potrebu provođenja eksperimentalnog programa podržanog teoretskim i numeričkim analizama za točnija i pouzdanija rješenja u vezi s tim pitanjem.

## Zahvale

Istraživanje je podržalo Ministarstvo obrazovanja, znanosti i tehnološkog razvoja RS kroz projekt TR-36048. Autori zahvaljuju tvrtkama *Montanstahl ag Švicarska*, *Vetroelektrane Balkana Beograd*, *Armont SP Beograd*, *Institutu za ispitivanje materijala Beograd*, *Institutu za materijale i konstrukcije Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu*, *ConPro Novi Sad*, *Energoprojekt Industrija AD Beograd*, *Vekom Geo Beograd*, *CO-Designing*, *Peri Oplate Beograd*, *North Engineering Subotica*, *Amiga Kraljevo*, *Mašinoprojekt kopring d.o.o. Beograd*, *Sika Beograd*, *DvaD Solutions* i *Soko Inženjering Beograd*.

## LITERATURA

- [1] Eurocode 3: Design of steel structures - part 1-4: General rules - supplementary rules for stainless steels, including amendment A1 (2015), EN 1993-1-4:2006+A1:2015, Brussels, Belgium, CEN 2015.
- [2] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings EN 1993-1-1, Brussels, Belgium, CEN 2005.

- [3] Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting EN 1993-1-3, Brussels, Belgium, 2006.
- [4] Stang, A.H., Stricklenberg, L.R.: Results of some compression test of structural steel angles, U.S. Bureau of Standards, Technologic Papers No. 218, Govt. Printing Ofc., Washington, D.C. 1924
- [5] Wakabayashi, M., Nonaka, T.: On the buckling strength of angles in transmission towers, Bull., Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Japan, 15 (1965) 91, pp. 1-18.
- [6] Kitipornchai, S., Lee, H.W.: Inelastic experiments on angle and tee struts, J. Constr. Steel Res., London, England, 6 (1986) 3, pp. 219-236, [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(86\)90035-0](https://doi.org/10.1016/0143-974X(86)90035-0)
- [7] AS 1250-1981 SAA Steel Structures Code, Standards Association of Australia, Sydney, Australia, 1981.
- [8] Specification for the Design, Fabrication and Erection of Standard Steel for Buildings, American Institute of Steel Construction, New York, NY, 1978.
- [9] Al-Sayed, S.H., Bjorhovde, R.: Experimental study of single angle columns, J. Constr. Steel Res., London, England, 12 (1989) 2, pp. 83-102, [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(89\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0143-974X(89)90026-6)
- [10] Adluri, S.M.R.A., Madugula, M.K.S., Monforton G.R.: Schifflerized angle struts, J. Struct. Eng., 118 (1992) 7, pp. 1920-1936, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:7\(1920\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:7(1920))
- [11] Adluri, S.M.R.A., Madugula, M.K.S.: Flexural buckling of steel angles: experimental investigation, J. Struct. Eng., 122 (1996) 3, pp. 309-317, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:3\(309\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(309))
- [12] Adluri, S.M.R.A., Madugula, M.K.S.: Development of column curve for steel angles, J. Struct. Eng., 122 (1996) 3, pp. 318-325, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:3\(318\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(318))
- [13] Popovic, D., Hancock, G.J., Rasmussen, K. J. R.: Axial compression tests of cold-formed angles, J. Struct. Eng., 125 (1999) 5, pp. 515-523, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:5\(515\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:5(515))
- [14] Young, B.: Tests and Design of Fixed-Ended Cold-Formed Steel Plain Angle Columns, J. Struct. Eng., 130 (2004) 12, pp. 1931-1940, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:12\(1931\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:12(1931))
- [15] Mohan, S.J., Rahima Shabeen, S., Samuel Knight, G.M.: Behaviour of cold formed lipped angles in transmission line towers, Thin-Walled Structures, 44 (2006), pp. 1017-1030, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.07.006>
- [16] Shifferaw Y., Malite, M., Schafer B.W., Chodraui, G.M.B.: Cold-formed Steel Angles under Axial Compression - 18<sup>th</sup> International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 2006.
- [17] Young, B., Chen J.: Column tests of cold-formed steel non-symmetric lipped angle sections", Journal of Constructional Steel Research, 64 (2008), pp. 808-815, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.021>
- [18] NAS. North American Specification for the design of cold-formed steel structural members. North American Cold-formed Steel Specification. Washington (DC): American Iron and Steel Institute; 2001.
- [19] Shi, G., Liu, Z., Ban, H.Y., Zhang, Y., Shi, Y.J., Wang, Y.Q.: Tests and finite element analysis on the local buckling of 420 MPa steel equal angle columns under axial compression, Steel and Composite Structures, 12 (2011) 1, pp. 31-51, <https://doi.org/10.12989/scs.2012.12.1.031>
- [20] ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2016.
- [21] Cao, K., Guo, Y., Zeng, D.: Buckling behavior of large-section and 420 MPa high-strength angle steel columns, Journal of Constructional Steel Research, 111 (2015), pp. 11-20
- [22] GB50017-2003. Code for design of steel structures. Beijing: China Architecture & Building Press; 2003
- [23] Bhilawe, J.V., Gupta, L.M.: Experimental investigation of steel equal angle subjected to compression, Engineering Structures and Technologies, 7 (2015) 2, pp. 55-66, <https://doi.org/10.3846/2029882X.2015.1113892>
- [24] Landesmann, A., Camotim, D., Dinis, P.B., Cruz, R.: Short-to-intermediate slender pin-ended cold-formed steel equal-leg angle columns: Experimental investigation, numerical simulations and DSM design, Engineering Structures, 132 (2017), pp. 471-493, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.034>
- [25] de Menezes, A.A., da S. Vellasco, P.C.G., de Lima, L.R.O., da Silva, A.E.: Experimental and numerical investigation of austenitic stainless steel hot-rolled angles under compression, Journal of Constructional Steel Research, 152 (2019), pp. 42-56, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.05.033>
- [26] EN ISO 6892-1, Metallic materials — tensile testing, Part 1: Method of Test at Room Temperature. European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 2009.
- [27] EN 10088: Stainless steels - Part 5: Technical delivery conditions for bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for construction purposes, European Standard CEN, 2009.
- [28] Arrayago, I., Real, E., Gardner, L.: Description of stress-strain curves for stainless steel alloys, Mater. Des., 87 (2015), pp. 540-552.
- [29] Dobrić, J., Budjevac, D., Marković, Z., Gluhović, N.: Behaviour of stainless steel press-braked channel sections under compression, J. Constr. Steel Res., 139 (2017), pp. 236-253, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.005>
- [30] Timoshenko, S., Gere, J.M.: Theory of elastic stability, Engineering Societies Monograph, McGraw-Hill, New York, 1961.
- [31] ABAQUS User Manual, Version 6.12, Providence RI, USA: DS SIMULIA Corp, 2012.
- [32] Dobrić, J., Pavlović, M., Marković, Z., Buđevac, D., Spremić, M.: Resistance of cold-formed built-up stainless steel members - Part II: Numerical simulation, J. Construct. Steel Res., 140 (2018), pp. 247-260.
- [33] Landesmann, A., Camotim, D., Dinis, P.B., Cruz, R.: Short-to-intermediate slender pin-ended cold-formed steel equal-leg angle columns: Experimental investigation, numerical simulations and DSM design, Engineering Structures, 132 (2017), pp. 471-493, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.034>
- [34] Dinis, P.B., Camotim, D.: A novel DSM-based approach for the rational design of fixed-ended and pin-ended short-to-intermediate thin-walled angle columns, Thin-Walled Struct, 87 (2015) 2, pp. 158-82, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.10.013>
- [35] Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures EN 1090-2, Brussels, Belgium, CEN 2018.
- [36] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements EN 1993-1-5, Brussels, Belgium, CEN 2006.
- [37] Structural steel equal and unequal leg angles - Part 2: Tolerances on shape and dimensions. EN 10056-2, Brussels, Belgium, CEN 1998.
- [38] ECCS. Manual on stability of steel structures. European Convention for Constructional Steelwork, 1976.
- [39] Može, P., Cajot, L.G., Sinur, F., Rejec, K., Beg, D.: Residual stress distribution of large steel equal leg angles, Engineering Structures, 71 (2014), pp. 35-47, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.040>
- [40] Cruise, R.B., Gardner, L.: Residual stress analysis of structural stainless steel sections, J. Constr. Steel Res., 64 (2008), pp. 352-366, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.08.001>
- [41] Gardner, L., Cruise, R.: Modeling of residual stresses in structural stainless steel sections, J. Struct. Eng. ASCE 135 (2009) 1, pp. 42-53, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:1\(42\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:1(42))